

Ligas de Níquel: soluções para grandes desafios

VDM Alloy 31 Plus ® como seleção inteligente para novas tecnologias sustentáveis

Julia Botinha, Helena Alves

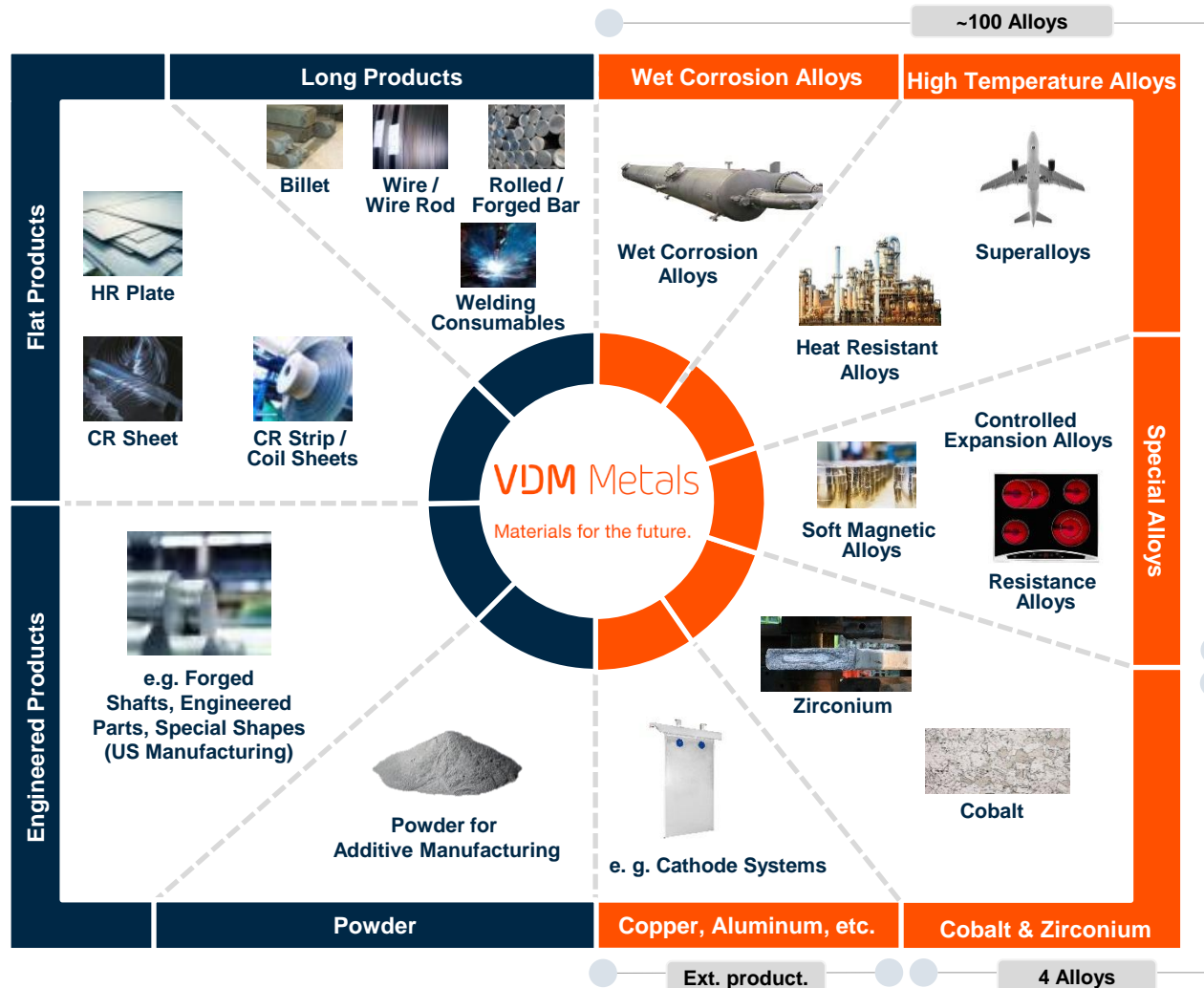
VDM Metals International GmbH, Altena, Germany

Rio de Janeiro, 31 de Outubro de 2025



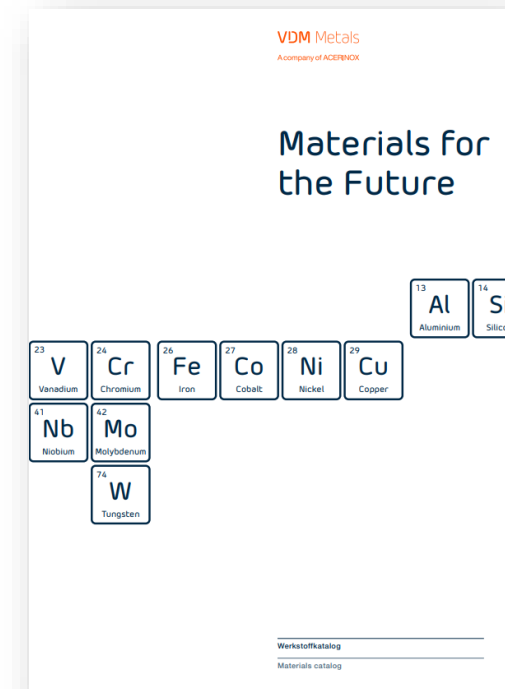
Portfólio de Produtos

A VDM Metals oferece mais de 100 ligas em vários formatos e dimensões



Acesse o link para o nosso portfólio de materiais:

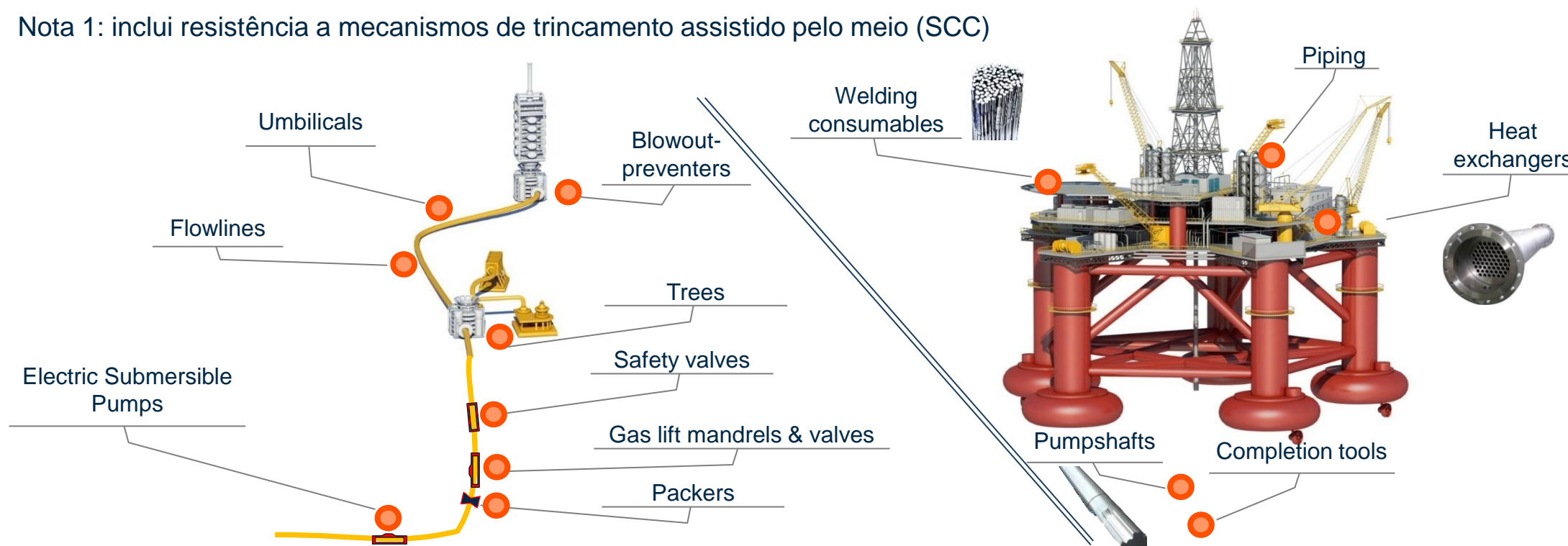
https://www.vdm-metals.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Brochures/VDM_Metals_Werkstoffkatalog.pdf



Ligas de níquel são selecionadas quando são a solução mais econômica ou a última opção para atender aos requisitos de projeto de engenharia e aplicação.

- No geral, ligas de níquel são selecionadas devido aos seguintes atributos:
 - Resistência à corrosão¹ na aplicação
 - Propriedades mecânicas para atender aos requisitos de projeto, geralmente associadas à resistência à corrosão¹
 - Propriedades não-magnéticas aliadas à resistência à corrosão¹ e/ou propriedades mecânicas

Nota 1: inclui resistência a mecanismos de trincamento assistido pelo meio (SCC)



Trincamento e mecanismos de corrosão

Corrosão localizada será abordada como fator determinante para o principal mecanismo de falha com base em ambientes que contém H_2S

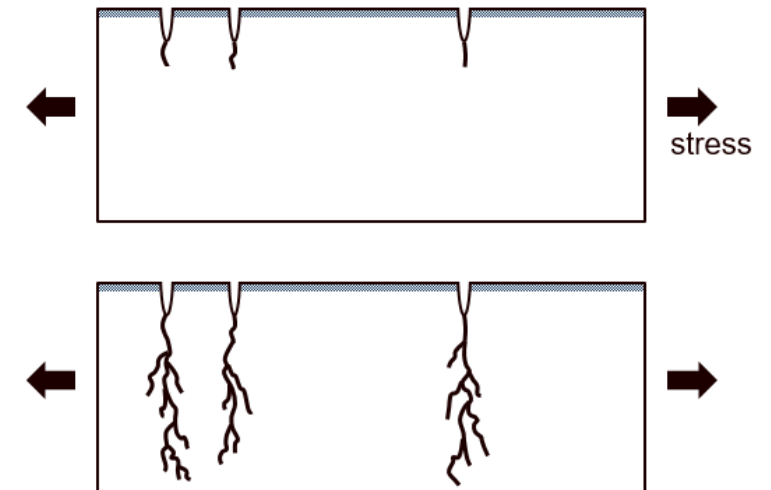
- CRAs podem sofrer diferentes tipos de degradação:
 - Corrosão uniforme
 - Corrosão localizada (pites ou frestas)
 - Trincamento assistido pelo meio ambiente

Mecanismos de trincamento prevalentes em diferentes ligas (acc. NACE MR0175)					
Materials	H2S cracking mechanisms				
	SSC	HIC/SWC	SOHIC	SCC	GHSC
Carbon and low-alloy steels	X	X	-	-	-
Casr irons	X	-	-	-	-
Austenitic stainless steels	-	-	-	X	-
Highly-alloyed austenitx stainless steels				X	
Solid-solution nickel-based alloys				X	
Ferritic stainless steels	X				X
Martensitic stainless steels	X				X
Duplex stainless steels				X	
Precipitation-hardened martensitic stainless steels	X				
Precipitation-hardened austenitic stainless steels					
Precipitation-hardened nickel-based alloys				X	
cobalt-based alloys				X	
Titanium and tanthalum					
Copper and aluminium					

Tração + meio corrosivo

Trincas de SCC geralmente se iniciam em pontos de concentração de tensão!

- Entalhes
- Arranhões
- Locais de corrosão localizada



Ligas em solução sólida e/ou trabalhadas a frio

Ligas em solução sólida e/ou trabalhadas a frio									
Composição química nominal dos elementos de liga primários (wt.%)									
Liga	UNS	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Ti	Al	outros
400	N04400	---	66	---	---	32	---	---	---
602CA	N06025	25	60	---	---	---	0.2	2.4	---
690	N06690	29	58	---	---	---	---	---	---
699XA	N06699	30	67	---	---	---	---	2.2	---
825	N08825	21.5	42	3	---	2.2	0.9	---	---
32	N08032	22	32	4.3	---	---	---	---	---
2535	N08535	25.5	33	3.3	---	---	---	---	---
28	N08028	27	31	3.5	---	1	---	---	---
825 CTP	N08827	22	41	5.5	---	2.8	---	---	---
42	N08042	21.5	42	6	---	2.3	---	---	---
33	R20033	33	30	1.6	---	0.6	---	---	N = 0.4
G3	N06985	22	48	7	---	2	---	---	---
2550	N06255	24.5	50	7	---	---	---	---	---
G50	N06950	20	52	9	---	---	---	---	---
31	N08031	26.5	31	6.5	---	1.2	---	---	N = 0.15 Mn = 2.0
31 Plus	N08034	26.5	34.2	6.5	---	1	---	---	N = 0.18 Mn = 2.5
625	N06625	21.5	66	9	3.6	---	---	---	---
C-22	N06022	22	56	13	---	---	---	---	W = 3
C276	N10276	15.5	58	16	---	---	---	---	W = 4.3
686	N06686	20	57	16	---	---	0.2	---	---
59	N06059	23	59	15.8	---	---	---	0.3	---
B2	N10665	---	69	26	---	---	---	---	---
2120	N06058	21	57	20	---	---	---	0.3	N = 0.1
B-4	N10629	1	66	28	---	---	---	0.3	---

Resistência à corrosão

CPT e CCT de ligas de níquel selecionadas em diferentes meios de teste												
UNS	Elemento (wt.%) ^a			PRE ^b	CPT (°C)				CCT (°C)			
	Cr	Mo	W		Meio1 ^c	Meio2 ^d	Meio3 ^e	Meio4 ^f	Meio1 ^g	Meio2 ^d	Meio3 ^e	Meio4 ^f
N08825	19.5	2.5		28	30*	45**	25*		5*		-5*	
N08827	21.0	4.5		36	50				20			
N08031	26.0	6.0		46	>85	75		48**	60			
N06625	20.0	8.0		46	>85*	75*	90*	41*	35*	85*	50*	
N08034	26.0	6.0		47	>85	75			60			
N06022	20.0	12.5	2.5	65	>85*	120*	150*		75*	105*	102*	
N10276	14.5	15.0	3	69	>85*	105*	150*	83*	50*	105*	80*	
N07022	20.0	15.5		71	>85*	>120*			100*			
N06059	22.0	15.0		72	>85*	>120*		100*		110*		
N06686	19.0	15.0	3	73	>85*	>120*			>85	110*		
N06058	20.0	18.5		81	>85	>145				125		

^a Valores mínimos em percentual em massa de acordo com a SAE-ASTM

^b De acordo com $PRE = Cr + 3.3(Mo + 0.5W) + 16N$

^c De acordo com ASTM G48 Method C in 6% FeCl₃ + 1% HCl

^d 11.5% H₂SO₄ + 1.2% HCl + 1% FeCl₃ + 1% CuCl₂

^e 4% NaCl + 0.1% Fe₂(SO₄)₃ + 0.01 mol/L HCl

^f 4.5 mol/L CaCl₂

^g De acordo com ASTM G48 Method D in 6% FeCl₃ + 1% HCl

* Fonte: Klapper, Helmuth & Zadorozne, N.s & Rebak, Raul. (2017). Localized Corrosion Characteristics of Nickel Alloys: A Review. Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 30. 10.1007/s40195-017-0553-z.

**Fonte: Rebak (2016). Pitting Characteristics of Nickel Alloys - A Review.

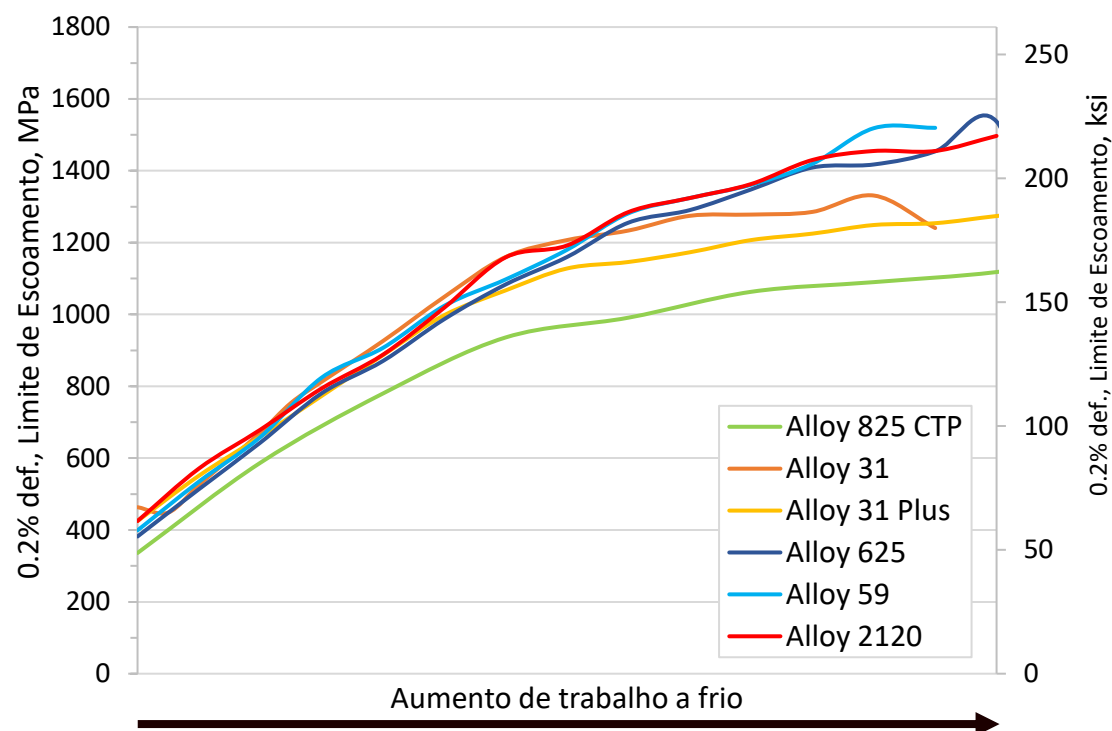


Ligas em solução sólida e/ou trabalhadas a frio

Usadas em diferentes condições (recozidas ou trabalhadas a frio - quando os requisitos de projeto incluem altos níveis de resistência mecânica)

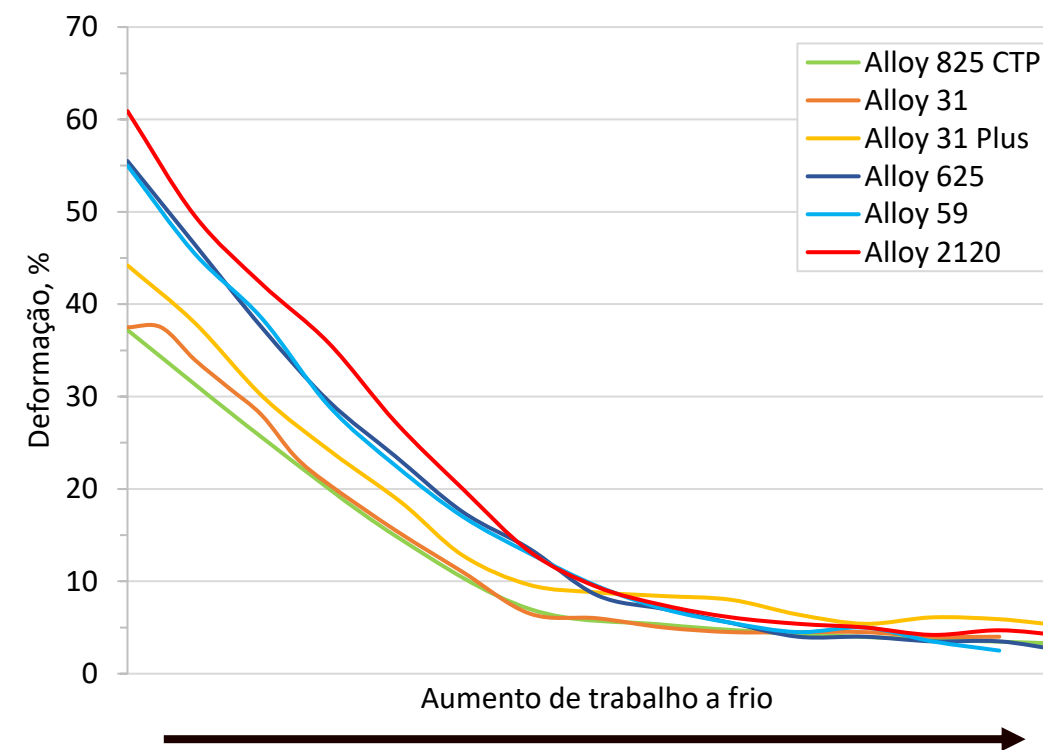
Limite de escoamento

Limite de escoamento após imposição de trabalho a frio



Deformação

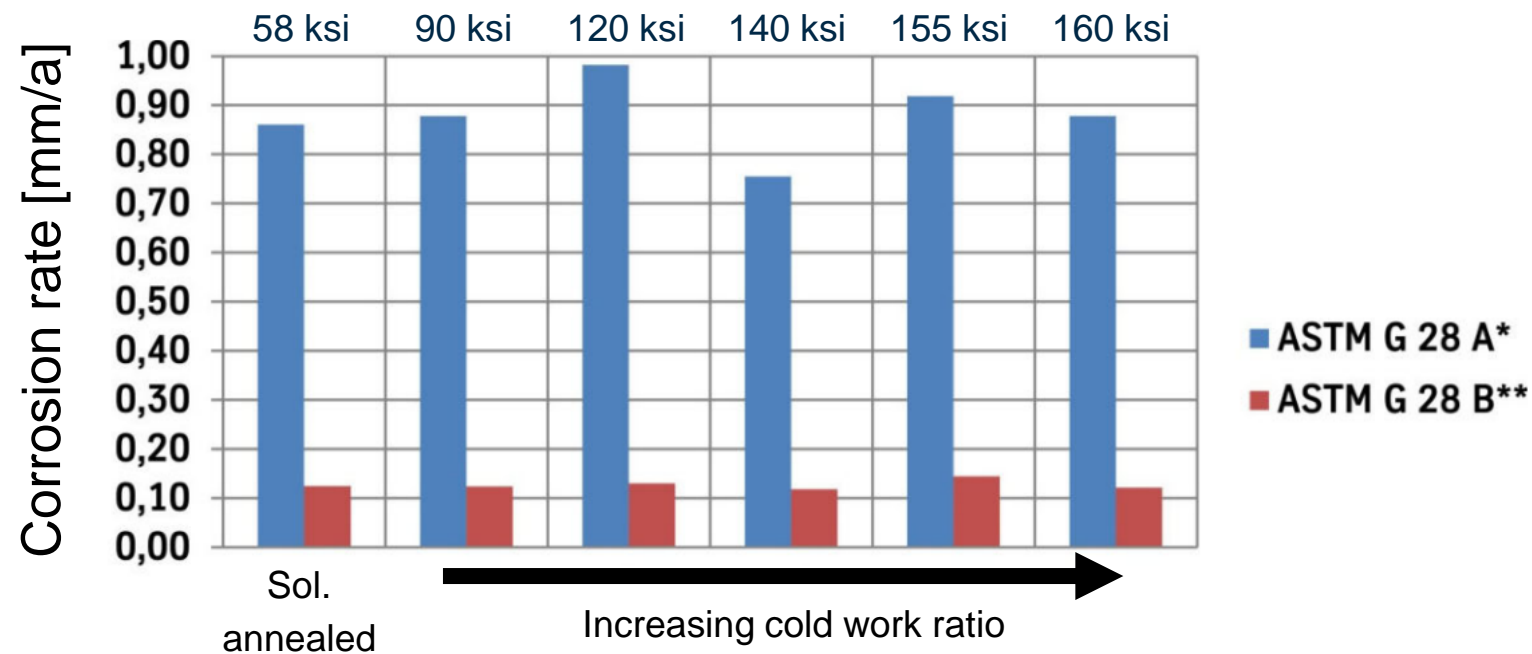
Deformação após imposição de trabalho a frio



Ligas em solução sólida e/ou trabalhadas a frio – VDM ® Alloy 59

A resistência à corrosão original da liga 59 não é afetada pela aplicação de trabalho a frio.

	Ni	Fe	Cr	Mo	C	S	Mn	Si	Cu	P	Al	Co
Min.	Bal.		22.0	15.0							0.1	
Max.		1.5	24.0	16.5	0.01	0.01	0.5	0.1	0.5	0.015	0.4	0.3



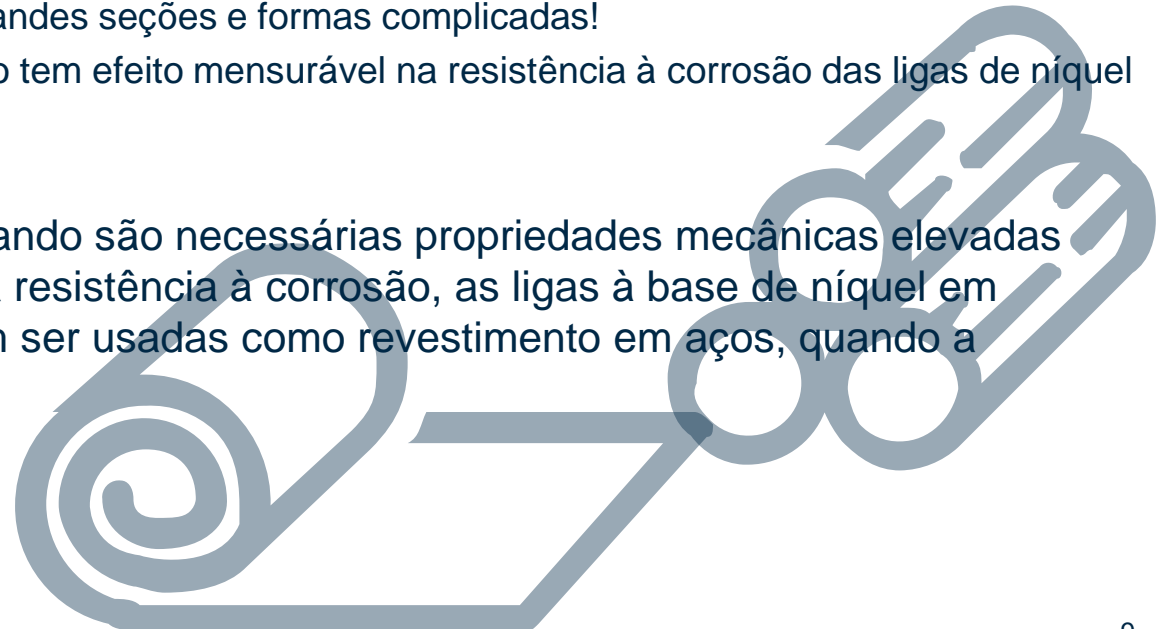
* Medium: 50% H₂SO₄ + 42 g/l Fe₂(SO₄)₃ x 9H₂O

** Medium: 23% H₂SO₄ + 1,2% HCl + 1% CuCl + 1% FeCl₃ x 6H₂O

Resumo



- As ligas de níquel em solução sólida são formadas por uma matriz austenítica de fase única que geralmente oferece resistência à corrosão muito alta, mas resistência mecânica limitada.
- O trabalho a frio é usado como alternativa para aumentar a resistência mecânica dessa família de ligas, sendo possível atingir níveis muito altos de limite de escoamento.
 - O fator limitante: grandes seções e formas complicadas!
 - O trabalho a frio não tem efeito mensurável na resistência à corrosão das ligas de níquel em solução sólida!
- Alternativamente, quando são necessárias propriedades mecânicas elevadas combinadas com boa resistência à corrosão, as ligas à base de níquel em solução sólida podem ser usadas como revestimento em aços, quando a aplicação o permitir..



Ligas de níquel endurecidas por precipitação

Ligas de níquel endurecidas por precipitação requerem a adição de elementos de liga que promovem a precipitação das fases que promovem o endurecimento.

Ligas de níquel endurecidas por precipitação									
Composição química nominal dos elementos de liga primários (wt.%)									
Liga	UNS	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Ti	Al	outros
K500	N05500	---	66	---	---	30	0.6	2.7	---
X750	N07750	15.5	72	---	1	---	2.5	0.7	Fe = 7
780		18	45	3	5.4	---	0.3	2.2	Co=24, Fe=0.6
718	N07718	19.0	53.0	3.0	5.1	---	0.9	0.5	Fe = 19
925	N09925	21.5	42	3	---	---	2.2	0.3	Fe = 28
945	N09945	21	48	3.3	3.3	2.3	1.5	0.3	Fe = 19
935	N09935	20.9	36.5	4	0.6	1.5	2.2	---	Fe = 33
48	N07048	21	48	7	---	1.7	1.8	0.6	Fe=18
725	N07725	20.8	57	8.2	3.4	---	1.4	---	Fe = 9
625 Plus	N07716	20.5	61	8.3	3.4	---	1.3	---	Fe = 4

Alloys no portfólio da VDM

CPT e CCT de ligas de níquel selecionadas em diferentes meios de teste

UNS	Elemento (wt.%) ^a			PRE ^b	CPT (°C)				CCT (°C)			
	Cr	Mo	W		Meio1 ^c	Meio2 ^d	Meio3 ^e	Meio4 ^f	Meio1 ^g	Meio2 ^d	Meio3 ^e	Meio4 ^f
N05500					40							
N07718	17.0	2.8		26	45*	45*			<10*		≤25	
N09925	19.5	2.5		28	35*				<0			
N09935	19.5	3.0		29	30**							
N09946	19.5	3.0		29	45*							
N09955	20.0	5.5		38	70**							
N07716	19.0	7.0		42	>85*						35*	
N07725	19.0	7.0		42	>85*	75*			25*			

^a Valores mínimos em percentual em massa de acordo com a SAE-ASTM

^b De acordo com $PRE = Cr + 3.3(Mo + 0.5W) + 16N$

^c De acordo com ASTM G48 Method C in 6% $FeCl_3$ + 1% HCl

^d 11.5% H_2SO_4 + 1.2% HCl + 1% $FeCl_3$ + 1% $CuCl_2$

^e 4% NaCl + 0.1% $Fe_2(SO_4)_3$ + 0.01 mol/L HCl

^f 4.5 mol/L $CaCl_2$

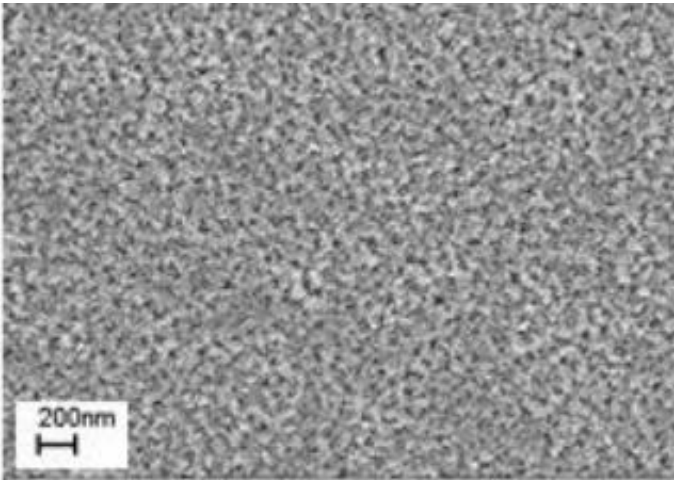
^g De acordo com G48 Method D in 6% $FeCl_3$ + 1% HCl

* Fonte: Klapper, Helmuth & Zadorozne, N.s & Rebak, Raul. (2017). Localized Corrosion Characteristics of Nickel Alloys: A Review. Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 30. 10.1007/s40195-017-0553-z.

** Fonte: Malara, Carlo (2015). UNS N09955: A New Ni-Base Alloy for H₂S and Hydrogen Charging Environments. C2015-51315



Resumo



- São necessários elementos de liga nobres para promover a precipitação de fases de endurecimento – custo mais elevado de metal.
- Possibilidade de obter propriedades mecânicas elevadas através de tratamentos térmicos.
 - Flexibilidade em termos de dimensões e formatos.
- Resistência à corrosão ainda elevada, porém limitada em comparação com as ligas de níquel em solução sólida.
- Fases intermetálicas podem atuar como locais ativos para o início da corrosão localizada e levar ao acoplamento microgalvânico.



- Originalmente desenvolvida para preencher a lacuna entre os aços inoxidáveis 6-Mo de alta-liga e as ligas à base de níquel da família C.
- Posteriormente otimizada para os requisitos da indústria de óleo e gás.
- Cr, Mo e N → alta resistência à corrosão
- Teor de níquel → estabilização da microestrutura austenítica
- Excelente exemplo de material de alto desempenho (resistência à corrosão) e baixo custo

UNS	Composição química típica (wt.%)						PREN
	Fe	Ni	Cr	Mo	C	Outros	
N08034	Bal.	34	26.5	6.5	< 0.01	Cu, N	54
N06625	2	60	22	9	0.02	3.5Nb	54

$\text{PREN} = \text{wt.\%Cr} + 3.3 \times \text{wt.\%Mo} + 30 \times \text{wt.\%N}$



VDM Alloy 31 Plus ® como seleção inteligente para novas tecnologias sustentáveis

- Propriedades na condição recozida

Propriedades mecânicas

	R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	A [%]
ASTM B 625-21	Min. 650	Min. 280	Min. 40

Resistência corrosão localizada

	Alloy 31 Plus	Alloy 625**
ASTM G28, Method A *1	0.22 mm/a	0.40 mm/a
ASTM G48, Method C *2	>85 °C	>85 °C
ASTM G48, Method D *3	70 °C	35 °C
*1: 50 wt.% H ₂ SO ₄ + 42 g/l Fe ₂ (SO ₄) ₃ x 9 H ₂ O, boiling, 24 h *2: 6 wt.% FeCl ₃ + 1 wt.% HCl, 72 h intervals *3: 6 wt.% FeCl ₃ + 1 wt.% HCl, 72 h intervals		

**Klapper et al.: Localized corrosion Characteristics of Nickel Alloys: A Review

Resistência à corrosão em diferentes meios

Meio	Temp. [°C]	Taxa de corrosão [mm/a]			
		Alloy 31 Plus	Alloy 31	Alloy 625	Alloy 926
Ácido sulfúrico 5%	Ebulição	0,32	0,36	0,23**	0,68
Ácido sulfúrico 10%	Ebulição	0,58	0,59	0,44*	1,6
Huey (ácido nítrico 65%)	Ebulição	0,08	0,07		0,36
Ácido clorídrico 5%	50	0,01	0,01	<0,01***	1,3
Ácido clorídrico 10%	25	0,58	0,63	0,62*	0,62
Ácido clorídrico 20%	25	0,39	0,42		0,42
Ácido fosfórico 50% / 1000 ppm cloreto	90	0,003	0,003		0,017

* P. Ganesan et al. Versatile Corrosion Resistance of Inconel alloy 625 in various aqueous and Chemical Processing Environments

** ATI Technical data sheet

*** <https://haynesintl.com/en/alloys/alloy-portfolio/high-temperature-alloys/haynes-625/#iso-corrosion-diagrams>

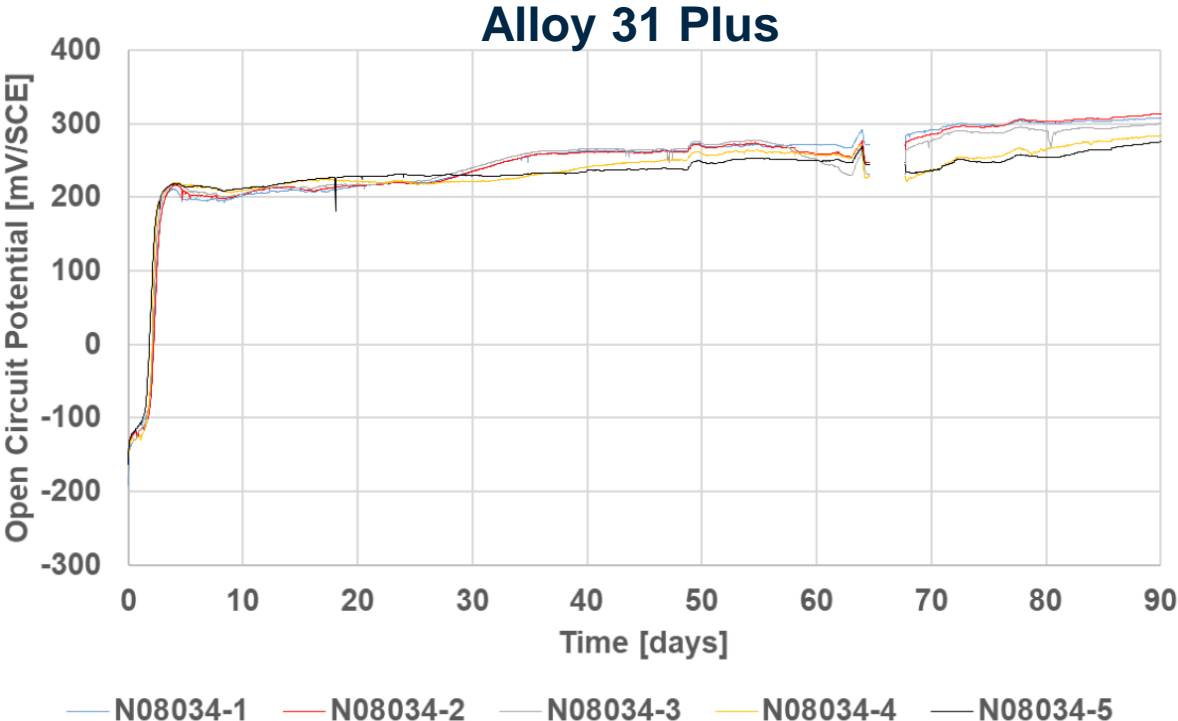
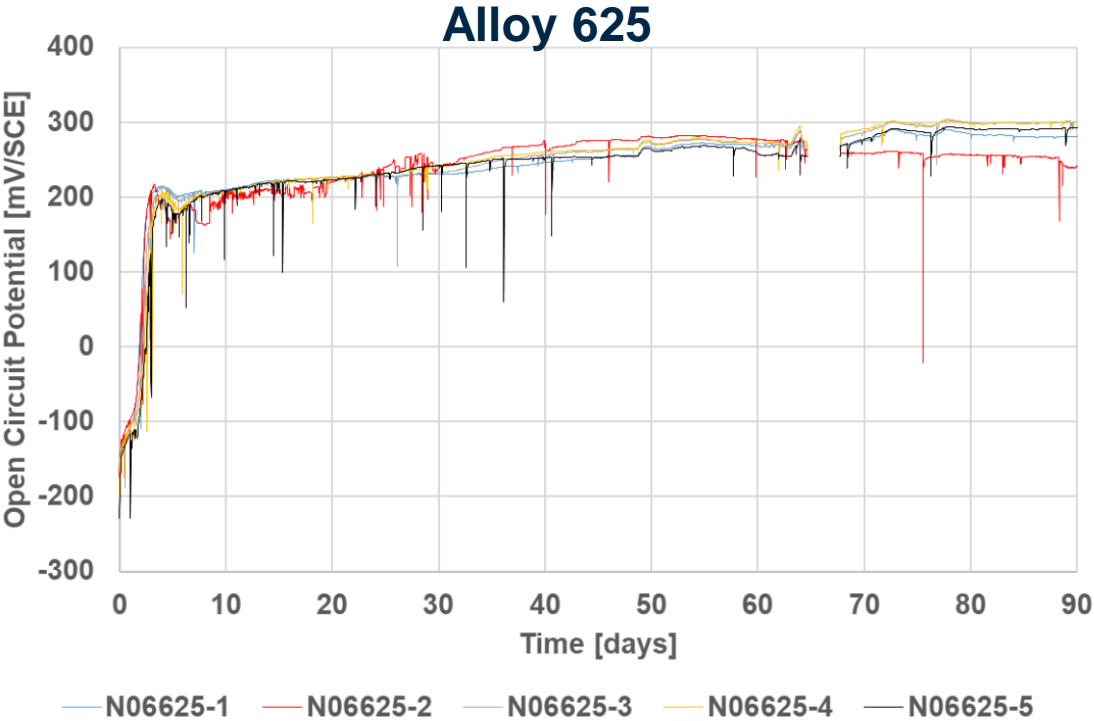
VDM Alloy 31 Plus ® como seleção inteligente para novas tecnologias sustentáveis

- Superior desempenho da liga 31 Plus

Material	Sem corrosão	Superficial etching	Corrosão
N06625	4/5	1/5	
N08034	5/5		

Resistência à água do mar não tratada

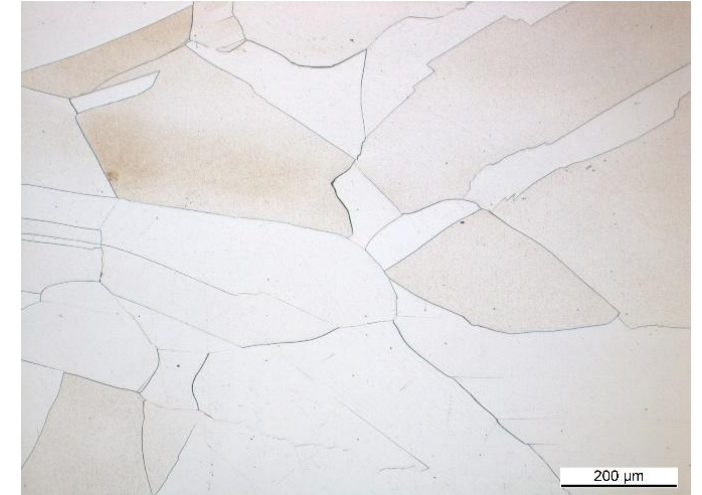
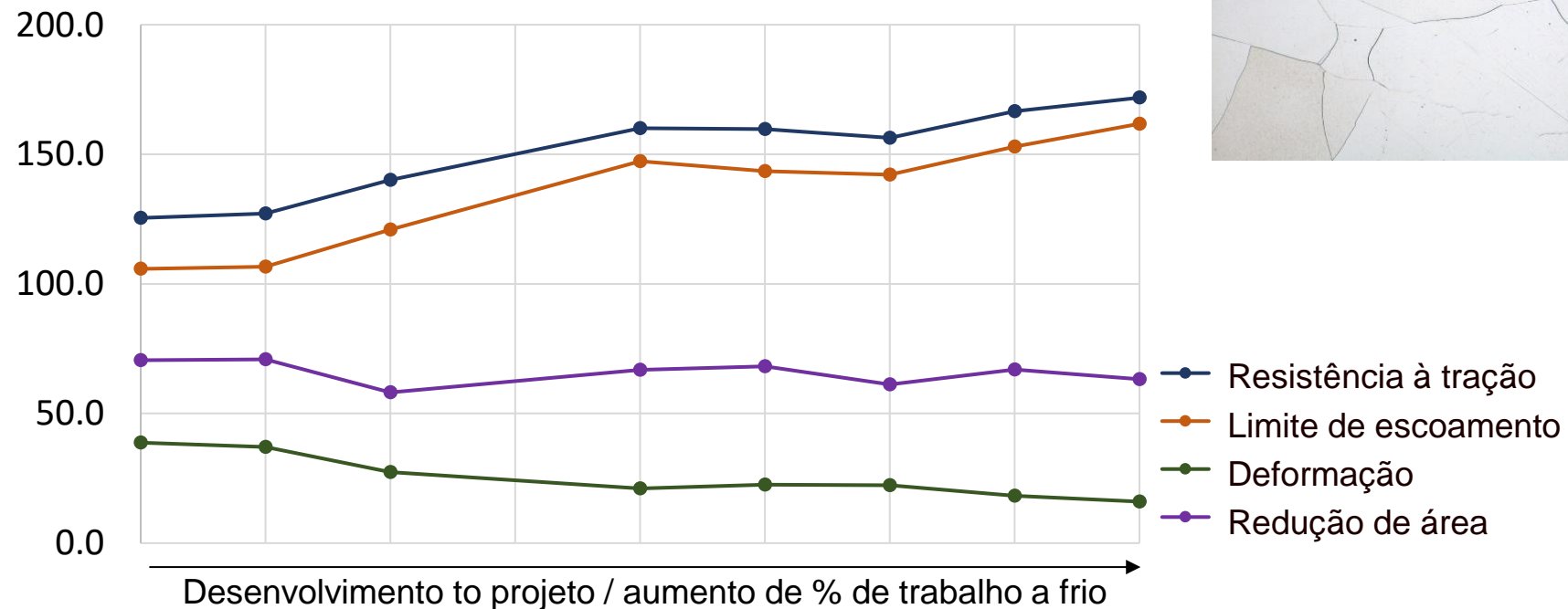
- Propriedades na condição recozida, 30 °C, 20 N/mm²



- Propriedades na condição trabalhada a frio

Microestrutura e propriedades mecânicas

- Barras de até 200 mm de diâmetro
- Altas propriedades mecânicas (> 150 ksi de limite de escoamento)
- Resistência à corrosão > 718 CTP
- Vantagem de custo devido ao menor custo de metal

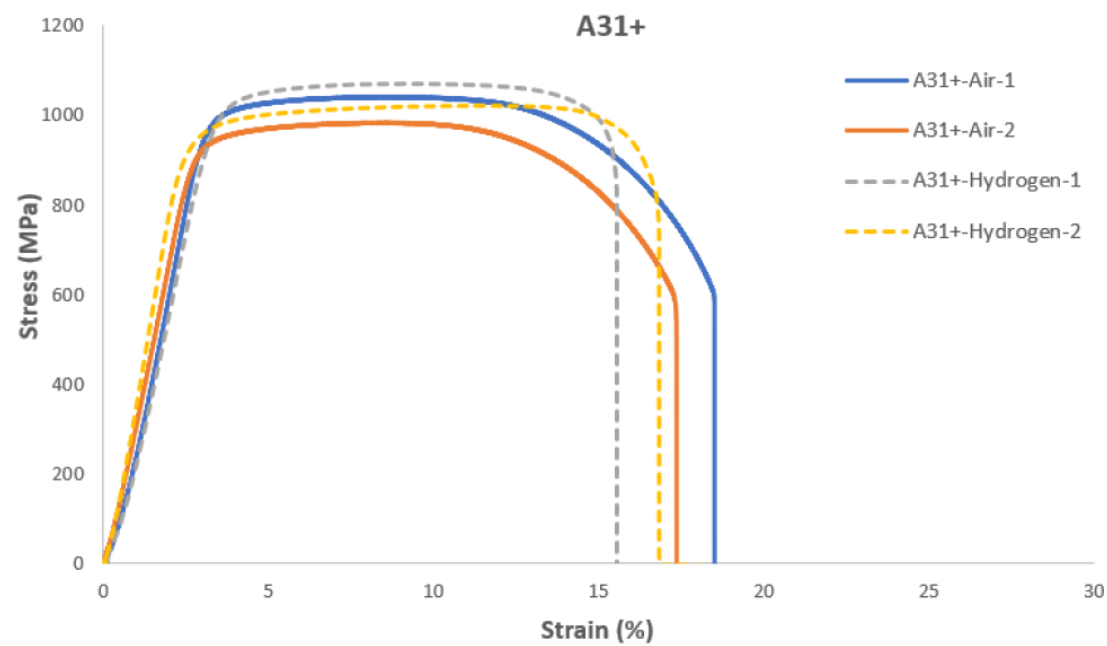


- Propriedades na condição trabalhada a frio

Fragilização por Hidrogênio

- Meio de controle: ar
- Fonte de Hidrogênio:

Pré-carregamento + 3.5%NaCl / -1100mV_{Ag/AgCl}



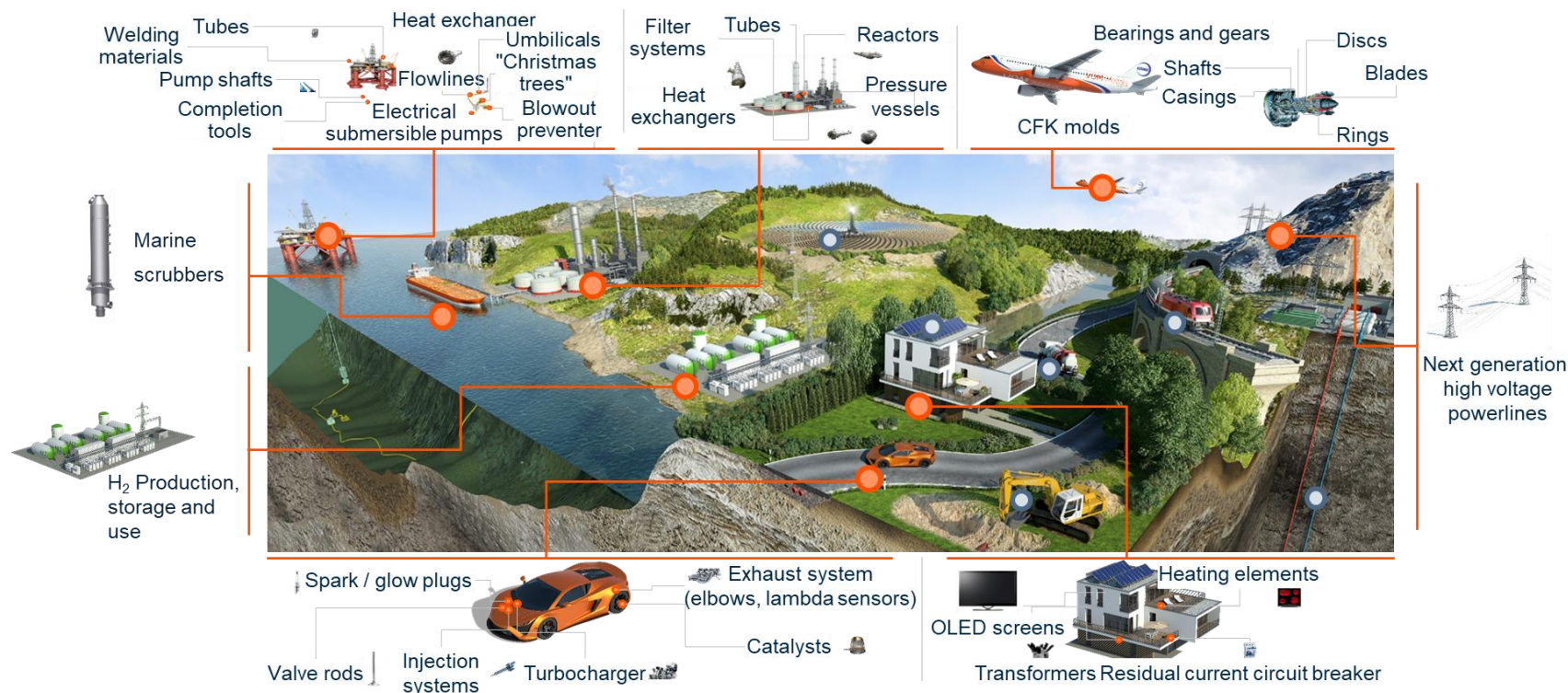
Resistência à corrosão localizada

	Solution annealed	Cold worked condition
ASTM G28, Method A *1	0.22 mm/a 24 h exposure time	0.14 mm/a
ASTM G48, Method C *2	90 °C	90 °C
ASTM G48, Method D *3	70 °C	65 °C
*1: 50 wt.% H ₂ SO ₄ + 42 g/l Fe ₂ (SO ₄) ₃ x 9 H ₂ O, boiling, 120 h *2: 6 wt.% FeCl ₃ + 1 wt.% HCl, 72 h intervals *3: 6 wt.% FeCl ₃ + 1 wt.% HCl, 72 h intervals		

Aplicações pretendidas/possíveis

- Revestimento para MLPs
- Parafusos
- CCUS (injeção de CO₂)
- Overlay Welding
- Energia geotérmica (OCTG)
- Processo de pré-tratamento de matéria-prima renovável
- Tratamento de águas residuais industriais
- Trocador de calor resfriado por água do mar
- Condensador da unidade de destilação de petróleo bruto da refinaria
- Produção de ácido fosfórico
- Dessulfurização de gases de combustão em nível intermediário
- Revestimento de proteção em usinas de conversão de resíduos em energia
- Cristalizador + evaporadores (indústria de sal)
- Transporte de ácidos e solventes residuais
- Depurador de gases de combustão
- ...

- As ligas de níquel são indispensáveis em muitas aplicações.
- Composições diferentes → resposta diferente a diferentes meios e requisitos de aplicação.
- A indústria de óleo e gás depende de ligas que foram desenvolvidas há muitas décadas sem visar essa aplicação específica.
- Novas tecnologias, nas quais a seleção de materiais ainda permite tomadas de decisão “fora da caixa” oferecem uma excelente oportunidade para uma seleção de novas ligas mais adequadas ao propósito da aplicação.
- A liga 31 Plus oferece propriedades de corrosão (e mecânicas, quando trabalhada a frio), que a colocam em posição de vantagem na seleção de materiais para uso em CCS/CCUS.



- Esses são os seus principais contatos para assuntos relacionados ao óleo e gás:



Helena Alves

Vice-President R&D
Research & Development
(Germany)

Helena.Alves@vdm-metals.com



Moritz Jordan

Vice-President Sales O&G
Sales
(Germany)

Moritz.Jordan@vdm-metals.com



Julia Botinha

Project Manager
Research & Development
(Germany)

Julia.Botinha@vdm-metals.com



Christian Heet

Applications Engineer
Sales
(Germany)

Christian.Heet@vdm-metals.com



Bill MacDonald

Applications Engineer
(USA)

Bill.Macdonald@vdm-metals.com